

「第1次視覚野における空間周波数処理の機能構造と その動作様式の解明」研究経過報告

平成 28 年 4 月 26 日受付

田 中 宏 喜*

要 旨

脳視覚情報処理の第一段階にある第一次視覚野において、異なる空間周波数成分の情報が統合される仕組みを解明するために、多点電極アレイにより同時計測された V1 野細胞集団の協調的活動を詳しく解析した。その結果、似た空間周波数選択性をもつ細胞がコラム方向に並び、その最適空間周波数の類似性が、応答潜時が長くなるにつれて低くなることが示唆された。またこれらの細胞が様々な時間スケールで活動同期しており、その同期がみられる空間範囲が層により違うことなどを示した。その他にも、神経回路モデリング、新規の多細胞神経活動計測システムの構築を行った。

キーワード：視覚情報処理、空間周波数、V1 野、大脳皮質、神経回路

脳視覚情報処理の第一段階にある V1 野では、大部分の神経細胞が、特定の方位や空間周波数成分をもつ線分や縞に選択的に反応し、この情報を伝達する。その後の情報処理過程において、多様な方位や空間周波数情報が適切に統合されていくなかで物体の視知覚が生じる。空間周波数成分の統合は、形、模様、奥行き、動きなど様々な視覚情報処理に決定的に重要であることが過去の研究から示されてきた。空間周波数情報統合のための細胞活動の相互作用は V1 野から始まることが示唆されている。しかしながら、この相互作用が適切に行われるために、V1 野がどのような局所機能構造や神経回路をもつのかはよくわかっていない。この点を解明することが本課題の大きな目的である。

上記の問題は、V1 野内部において、神経細胞集団が一般的にどのように結合しているのか、そして、どのような協調的活動をしているのかという問題と強く関連している。私は、以前からこの問題に取り組んでおり、32 チャンネルの信号記録点をもつ多点電極アレイ（ミシガンプローブとよばれる電極アレイ）を V1 野に刺入し、1 立方ミリメートル程度の小領域内部に存在する数十個の細胞集団の同時神経活動記録を行ってきた。視覚刺激としては、様々な方位や空間周波数の縞刺激をランダムな順序で呈示したムービー刺激を用いた。本課題では、この神経活動データを再解析し、神経細胞が近接したタイミングで発火活動をする同期現象を詳細に分析することを行った。過去の多くの研究から、ネコ V1 野には時間スケールの短い正確な神経活動同期と緩やかな時間スケールの同期が見られることが知られていた。私は過去の研究で、緩やかな同期が 6 層構造をもつ大脳皮質の第 4 層でもっとも

* 京都産業大学コンピュータ理工学部

弱い事を示し、この同期が高次視覚領野からのフィードバック結合によってもたらされていることを示唆した。この研究を発展させる形で、本課題では、これらの同期の水平方向、垂直方向の空間的広がり層ごとに詳しく分析し、浅層のほうが、正確な同期がより広い範囲でみられることを示した。また、時間スケールの異なる二種類の同期が、細胞の方位空間周波数刺激応答特性とどのように関係するのかについて詳細な解析を行った。これらの成果は、平成27年度のニューロコンピューティング研究会（沖縄、6月）、日本神経科学学会（神戸、7月）、北米神経科学学会（シカゴ、10月）で学会発表した。また、私の研究結果に加えて、V1野の機能的神経結合や神経集団の協調的活動についてのこれまで蓄積された知見をまとめた総説記事を日本神経回路学会誌に発表した。

本研究課題では、さらに、大脳皮質の局所コラム領域にどのような空間周波数特性を持つ細胞が集まり、そして上記の同期が空間周波数の相互作用にどのように寄与するのかを、上記の神経細胞集団の同時活動記録データから検討した。コラム構造とは、大脳皮質表面にたいして垂直な方向（深さ方向）に特性の似た細胞が並ぶという構造で、V1野では方位に関して整然としたコラム構造が存在することはよく知られている。しかしながら、空間周波数に関しては、垂直方向にどの程度チューニング特性の一致している細胞が並ぶのかこれまで厳密に調べられていない。本課題では、多点電極の利点を活かし、垂直方向に均等な間隔で位置する多数の細胞の最適空間周波数を比較することで、空間周波数チューニングの一致性を従来の研究よりも詳細に検討した。まだ十分なデータサンプルが得られていないが、今回の解析結果は、空間周波数に関しても浅層から深層にわたってかなり均質なコラムが存在することが示唆する。興味深いことに、これらの細胞は、しばしば、異なる時間特性をもち、刺激呈示からの潜時に依存して、局所領域の細胞集団の空間周波数チューニングのまとまりが弱くなっていくことがしばしば観察された。このことはV1野の局所領域で処理時間の進行とともに、異なる空間周波数の情報の相互作用が生じやすくなっていることを示唆する。この可能性をさらに検証していくためには、新たに細胞活動のデータを取得も行う必要があり、そのためのセットアップも本課題研究で行ってきたことである。32チャンネルの神経活動記録システムを構築し、数十個の細胞から良好な細胞外活動の同時記録が行えることを、ラットを用いた実験で確かめた。今後、このシステムで、V1野細胞集団の空間周波数チューニングのさらなる計測を行っていく予定である。

本課題ではまた、実験検証のみならず、コンピュータ上で神経ネットワークの再現シミュレーションを行うことで、視覚情報処理の計算理論的な分析も行った。V1野細胞は、方位や空間周波数のほか、奥行きの手がかりである両眼視差にも応答するが、これらの応答特性を数理モデル化し、そして細胞集団の階層的なネットワークを構築し、その挙動を分析した。その結果、特定の細胞集団で強い結合をもつときに、ネットワークが高い両眼視差識別機能をもつようになることが示唆された。この結果は平成28年度のニューロコンピューティング研究会（玉川大、3月）で発表した。

本課題の問題を解明するにはさらなる研究が必要である。この研究は、平成28年度科研費基盤研究(C)「V1野局所構造における空間周波数処理のダイナミクス」において継続していく。

(謝辞) 本課題の遂行にあたって、多大なるご支援を頂いた研究機構の方々に深く感謝を申し上げます。

発表リスト

(論文, 総説)

田中宏喜。V1野における異なる時間スケールの同期：多点電極アレイを用いた計測結果を中心に。日本神経回路学会誌 Vol 22, no4 pp.181-188 (2015)

(口頭発表)

1. 田中宏喜, 田村弘, 大澤五住。ネコ 17野・18野における神経同期発火の空間構造。信学技報 vol 115, no.111, NC2015-1, pp. 21-26, 2015. 6. 沖縄
2. 田中宏喜, 田村弘, 大澤五住。ネコ V1野における時間スケールの異なる神経活動相関の層構造, 日本神経科学学会 2015, 7 神戸
3. Tanaka H, Tamura H, and Ohzawa I. Vertical and horizontal structures of neuronal correlations in the cat primary visual cortex. Society for Neuroscience. Poster 52.91. 2015. 10. Chicago.
4. 芝田賢, 田中宏喜。ハイブリッド型視差検出器を入力とする3層ニューラルネットワークによる両眼視差の識別。信学技報 vol 115, no.514, NC2015-89, pp. 113-117。2016.3 玉川

Functional structures of spatial frequency processing and their activity patterns in the primary visual cortex

Hiroki TANAKA

Abstract

In this project, in order to explore the manner in which different spatial frequency (SF) components are integrated in the primary visual cortex (V1), the first cortical visual processing stage, I analyzed the details of cooperated activities of V1 neuronal population measured with multi-electrode arrays. My results suggest that neurons with similar SF selectivity are often vertically aligned and the similarity becomes weaker as response latency becomes longer. These neurons showed correlated firing activities in a variety of time-scale. The spatial range to which these correlations were observed depended on the cortical layer. In this project, I also conducted a modeling work of neuronal circuits of V1 and set up a new system for recording multi-unit neuronal activities.

Keywords : Visual information processing, spatial frequency, V1, cerebral cortex, neural circuits